

УДК 534.2

Н.П. Красненко

Приземное распространение звуковых волн в атмосфере

Рассмотрено влияние характеристик атмосферного канала на приземное распространение звуковых волн. Приведены алгоритмы для вычисления уровня звукового давления и описан программный комплекс «Прогноз», предназначенный для оперативного оценивания среднего поля звуковых давлений в приземном слое атмосферы, создаваемого удаленным источником звука. В программном комплексе учитываются характеристики источника звука, вертикальные профили основных метеорологических параметров атмосферы, характеристики подстилающей поверхности и параметры атмосферной турбулентности. Приведены результаты сравнения численных оценок уровня звукового давления и натурных испытаний комплекса для дальностей в 6 км от источника звука.

Ключевые слова: атмосфера, звук, распространение, прогноз уровня звука.

Как известно, дальность приземного распространения звуковых волн в атмосфере от одного и того же источника бывает различной в зависимости от существующих условий распространения звука [1–5]. Причина этих различий заключается в высокой чувствительности, распространяющегося звукового излучения в атмосфере к значениям таких метеорологических параметров, как скорость и направление ветра, температура, влажность воздуха и атмосферное давление, а также к их изменениям с высотой. Существенное влияние на дальность приземного распространения звука также оказывают характеристики турбулентности, подстилающей поверхности, геометрии распространения и самого источника звука.

Обычно при анализе характеристик распространяющихся звуковых волн рассматривают среднее состояние атмосферы, мало меняющееся на протяжении длины волны. На фоне этого относительно медленного изменения среды распространения существуют более мелкие и более быстрые изменения её характеристик, называемые турбулентными флуктуациями. Турбулентные флуктуации метеорологических параметров обычно вызывают вторичные эффекты [6, 7], к которым относятся флуктуации амплитуды и фазы волны, рассеяние звука, дополнительное ослабление энергии излучения турбулентностью, нарушения когерентности и т.д.

Средние значения перечисленных метеорологических параметров сказываются непосредственно как на абсолютном значении суммарного коэффициента поглощения звука на фиксированной частоте, так и на его частотной зависимости. Поглощение звука (потеря энергии) в атмосфере происходит таким образом, что на большие расстояния могут распространяться только его низкочастотные составляющие. При передаче широкополосных сигналов (например, речевых сообщений) это явление существенным образом влияет на амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) принимаемого сигнала [4, 5] и, следовательно, на разборчивость передаваемой информации.

Помимо непосредственного ослабления (поглощения) энергии распространяющихся в атмосфере звуковых волн, другим важным фактором при приземном распространении звука является влияние рефракции [8–11]. Это явление возникает вследствие неоднородности среды распространения волн и изменения скорости звука с высотой за счет изменений скорости ветра v и температуры воздуха T . Оно может быть рассмотрено на основе метода геометрической акустики. В этом методе используется представление о звуке как о волнах, распространяющихся вдоль лучевых траекторий, кривизна которых определяется изменениями с высотой скорости ветра v и температуры T и угловыми параметрами, характеризующими начальное направление излучаемого звука. При этом полагаем, что энергия звуковой волны не покидает лучевую трубку, сформированную семейством лучей, образующим при их поперечном сечении замкнутую кривую. Поэтому сходимость или расходимость лучей (изменение диаметра лучевой трубки) в геометрической акустике непосредственно влияет на интенсивность звука.

Принято различать три основных режима распространения звука [2, 3]: волноводный, антиволноводный и как промежуточный нейтральный режим (рис. 1).

Нейтральный режим распространения звука (рис. 1, *a*) характерен для относительно небольших расстояний и прямой видимости. Здесь в точке приема происходит интерференция прямого (излученного) и отраженного от поверхности Земли лучей.

В случае приземного распространения звука на большие расстояния характеристики звуковых волн определяются главным образом рефракцией на градиентах температуры и скорости ветра, результируясь в волноводный (рис. 1, *б*) или антиволноводный (рис. 1, *в*) режимы распространения звука. В первом случае лучи загибаются вниз с многократным переотражением от Земли. Относительно малые значения ослабления звука присущи этому режиму распространения звука. В другом случае лучи загибаются вверх и зона акустической тени возникает около Земли на определенном расстоянии от источника. Только очень слабый звук, рассеянный турбулентными неоднородностями в верхних слоях атмосферы, проникает в эту зону.

В мировой литературе имеется достаточно много публикаций, посвященных разработке алгоритмов и вычислительных процедур приземного распространения звука в различных приближениях, например в монографиях [12, 13].

В данной статье по результатам работ автора описываются апробированные алгоритмы для вычисления среднего уровня звуковых волн при приземном распространении. Приводится описание программного комплекса «Прогноз», созданного по этим алгоритмам, вместе с результатами его натурных испытаний и количественными оценками влияния наиболее важных метеорологических факторов на ослабление звука.

Математическая модель вычисления уровня звукового давления. К простейшему случаю прямого распространения звуковой волны в точку наблюдения можно отнести режим слабой рефракции, называемый, как уже приводилось, нейтральным. В этом режиме (см. рис. 1, *a*) в точку наблюдения приходят только два луча: прямой и отраженный от Земли, причем прямой луч не должен иметь точки поворота. Лучевая картина распространения звука при нейтральном режиме характеризуется пренебрежимо малой кривизной лучевых траекторий и может наблюдаться только при очень малых значениях градиентов скорости ветра и температуры или при малых расстояниях d до точки наблюдения. Расчет звуковых давлений в случае нейтрального режима можно выполнить без учета влияния рефракции по алгоритму

$$L_r(f) = L_s(f) + L_{abs}(f) + L_t(f) + L_e(f) + L_{div}(f) + L_{pat}(f), \quad (1)$$

где $L_r(f)$ – уровень звукового давления в точке наблюдения r на частоте f , дБ; L_s – звуковое давление, производимое источником, пересчитанное к расстоянию 1 м от источника; L_{abs} – вклад классического и молекулярного поглощения звука в воздухе; L_t – вклад турбулентного ослабления звука; L_e – вклад приземного ослабления звука (учитывается влияние интерференции прямой и отраженной волн); L_{div} – вклад угловой расходимости волны (в данном случае – сферической); $L_{pat} = 10 \lg[F(\alpha, \varphi, f)]$ – слагаемое, учитывающее влияние нормированной функции направленности источника $F(\alpha, \varphi, f)$.

Все слагаемые в правой части (1), кроме L_s , имеют, как правило, отрицательное значение. Соотношение (1) выражает закон сохранения энергии и является уравнением энергетического баланса. Алгоритмы расчета отдельных компонент ослабления звука подробно описаны в литературе (см., например, [14, 15]). Отметим, что при распространении звука в атмосфере на расстояния, превышающие 1 км, нейтральный режим практически никогда не наблюдается.

При расчете волноводного режима распространения звука вначале рассматриваются лучи прямого попадания в заданный пункт, которые существуют при наблюдаемых профилях вектора скорости ветра $\mathbf{v}(z)$ и скорости звука $c(z)$ в воздухе. Данный анализ проводится на основе уравнения луча,

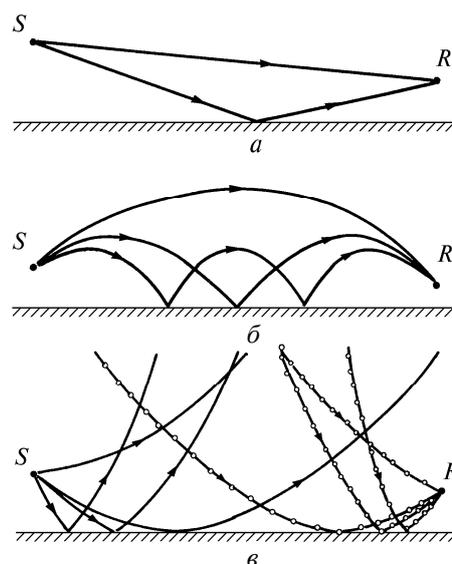


Рис. 1. Лучевые картины распространения звука в атмосфере при различных метеорологических условиях: *a* – нейтральный режим; *б* – волноводный режим (приведены только лучи типа «верх–низ»); *в* – антиволноводный режим. Здесь S – источник звука; R – приемник (точка наблюдения); ——— прямые лучи; - - - - - рассеянные лучи

описывающего горизонтальные координаты $\mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y)$ в любой точке луча, характеризуемого углами его выхода, определяемыми в двух ортогональных плоскостях: α и φ . В предположении, что среднее значение вертикальной компоненты вектора скорости ветра $v_z = 0$, уравнение луча имеет вид [9]

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \int_{z_<}^{z_>} \frac{\mathbf{K} \frac{\mathbf{v}}{c} + \mathbf{a}}{q} dz, \quad (2)$$

где \mathbf{r}_0 – горизонтальная координата начальной точки выхода луча; $z_<$ и $z_>$ – высоты нижней и верхней точек луча; \mathbf{K} – волновой вектор с волновым числом в движущейся среде $K(z) = [\omega - \mathbf{a} \cdot \mathbf{v}(z)]/c(z)$; $q(z) = \sqrt{K^2(z) - \mathbf{a}^2}$ – его вертикальная компонента; $c(z) \approx 20,067 \sqrt{T(z)}$; T – абсолютная температура воздуха, °К, $|\mathbf{a}| = k_0 \cos \alpha / \{1 + v_0/c_0 \cos \alpha \cos(\varphi_v - \varphi)\}$, $k_0 = \omega/c_0$, и $\omega = 2\pi f$. Здесь индексом «0» обозначены значения различных параметров в начальной точке выхода луча $\mathbf{R}_0(x_0, y_0, z_0)$. Угол выхода луча α определяется в вертикальной плоскости как угол между нормалью к фазовому фронту волны в точке \mathbf{R}_0 и горизонтом. Углы φ и φ_v описывают азимутальные направления данной нормали и скорости ветра v_0 соответственно. Вектор \mathbf{a} лежит в горизонтальной плоскости и направлен под углом φ . В каждой точке луча он сохраняет постоянное значение и имеет смысл горизонтальной компоненты волнового вектора $\mathbf{K}(z)$.

Уравнение (2) в таком виде справедливо только для участка луча до точки его поворота. Однако оно легко обобщается на случай наличия точки поворота на высоте z_b путем замены

$$\int_{z_0}^{z'} dz \rightarrow \left(\int_{z_0}^{z_b} + \int_{z_b}^{z'} \right) dz,$$

где z' – высота конечной точки луча. Аналогично осуществляется обобщение (2) на случай нескольких точек поворота луча при его многократном отражении от Земли.

В соответствии с классификацией лучей для случая волноводного распространения волн [16], различаются четыре типа лучей в зависимости от того, на какой ветви луча (нисходящей или восходящей) находятся источник и приемник. В описываемых алгоритмах базовыми для расчетов звукового давления являются лучи типа «верх–низ» (см. рис. 1, б). Их порядковый номер i задается в программе по числу отражений луча от Земли j как величина $i = j + 1$. Характеристики данных лучей рассчитываются по точному алгоритму, основанному на прямом решении уравнения луча с известным числом точек его поворота, а характеристики лучей других типов – по приближенным соотношениям, используя результаты расчетов базовых лучей. При этом в энергетических расчетах наличие других лучей под тем же номером i , не относящихся к типу «верх–низ», учитывается путем интерференционной поправки L_{e_i} к звуковому давлению L_i , обусловленному наличием только i -го базового луча. С этой целью используется соотношение [11]:

$$L_e = -10 \cdot \lg \left\{ e^{-2\sigma_\chi^2} [1 + Q^2 (s/s_0)^2] + 2Q (s/s_0) e^{2\sigma_\chi^2 - D_s(\Delta\rho)} \cos[k_0 (s - s_0) + \theta] \right\},$$

где Q – модуль коэффициента отражения звука от подстилающей поверхности по амплитуде; θ – фаза этого коэффициента; σ_χ^2 – относительная дисперсия флуктуаций логарифма амплитуды звуковой волны; D_s – структурная функция флуктуаций разности фаз прямой и отраженной волн; s и s_0 – длины трасс распространения этих волн от источника к приемнику ($|s - s_0| < s, s_0$); $\Delta\rho$ – эффективное поперечное расстояние между их трассами. Величины σ_χ^2 и D_s вычисляются по формулам из [6], а Q и θ – на основе известной модели Делани–Безли [18] для комплексного акустического импеданса подстилающей поверхности и её модификаций.

При расчете базового луча под номером i известными величинами являются координаты x' и y' его конечной точки и число точек его поворота. Используя эти данные, требуется найти значение углов выхода i -го луча α_i и φ_i , т.е. решить задачу его нацеливания в заданный пункт. Аналитическое решение этой задачи при произвольных профилях $c(z)$ и $\mathbf{v}(z)$ получить из (2) невозможно. Поэтому для ее решения применяется метод дихотомии [19]. В этом алгоритме приходится многократно вычислять интегралы вида (2), что заметно сказывается на времени счета. Высоту точки поворота i -го луча z_{b_i} находим при каждой итерации из уравнения $q(\alpha_i, \varphi_i, z_{b_i}) = 0$, используя текущие в данной итерации значения углов выхода луча α_i и φ_i . При решении задачи нацеливания луча

полагаем, что $\varphi_i = \arctg(\bar{v}_\perp / c)$, где \bar{v}_\perp – среднее вдоль луча значение поперечного ветра, а итерационный поиск осуществляется только углу α_i . Численное сравнение с точной траекторией луча показало, что допускаемые в этом случае ошибки по α_i и φ_i намного меньше ширины диаграммы направленности реального источника звука и поэтому не могут заметно отразиться на результатах расчета звуковых давлений. Например, при $d = 5$ км, $v = 12$ м/с и угле 45° между направлениями ветра и трассы распространения звука ошибки оценивания α_i и φ_i будут иметь значения $0,6^\circ$ и $0,5^\circ$ соответственно.

После того как определены значения α_i и φ_i для всех лучей с номерами $N_{\min} \leq i \leq N_{\max}$ ($N_{\min} \geq 1$, $N_{\max} \geq N_{\min}$), становится возможным рассчитать $L_{abs\ i}$, $L_{t\ i}$, $L_{e\ i}$, $L_{pat\ i}$, и $L_{div\ i}$, а также Q_i . Величина $L_{div\ i}$ определяется здесь путем вычисления фактора фокусировки волны для каждого луча в его конечной точке [20]. Вследствие многолучевости распространения звука в данном режиме уравнение энергетического баланса усложняется и имеет вид

$$L_r(f) = L_s(f) + 10 \lg \left\{ \sum_{i=N_{\min}}^{N_{\max}} (Q_i^{2(i-1)} 10^{L_{\Sigma i}(f)/10}) \right\}, \text{ дБ} \quad (3)$$

где аналогично (1) $L_{\Sigma i} = L_{abs\ i} + L_{t\ i} + L_{e\ i} + L_{pat\ i} + L_{div\ i}$. Поскольку $Q_i < 1$, то в приближенных расчетах оказывается достаточным учитывать только 3–4 первых члена из суммы в (3). Допускаемая при этом ошибка в оценке $L_r(f)$ не превышает 0,1 дБ.

Алгоритм расчета уровня звукового давления в зоне тени [21] основывается на теории однократного рассеяния звука в атмосфере [6, 7, 12], уравнениях геометрической акустики для движущейся среды [10, 20].

Хорошо известно [7], что среднюю интенсивность рассеянного поля при излучении импульса, описываемого временной функцией $M(t)$, можно оценить в борновском приближении как

$$I_r(t) = I_0 \cdot \int_V \Pi(\mathbf{R}) \cdot M[t - \tau(\mathbf{R})] \sigma(\theta, \mathbf{R}) d z, \quad (4)$$

где интегрирование выполняется по точкам \mathbf{R} внутри рассеивающего объема V . Здесь I_0 – амплитудный множитель, не зависящий от t и \mathbf{R} ; $\tau(\mathbf{R})$ – время распространения звука по лучевой трассе длины $s(\mathbf{R})$ от источника до приемника с точкой рассеяния \mathbf{R} ; $\Pi(\mathbf{R})$ – весовая функция рассеивающего объема, которая должна учитывать все энергетические потери волны. В рассматриваемом случае эта функция представима в виде

$$\Pi(\mathbf{R}) = F[\alpha_1(\mathbf{R}) - \alpha_0, \varphi_1(\mathbf{R}) - \varphi_0] F_f(\mathbf{R}) F_e(\mathbf{R}) \exp[-\alpha_\Sigma s(\mathbf{R})], \quad (5)$$

где F – функция направленности источника, зависящая от разностей углов выхода прямого луча α_1 и φ_1 , нацеленного на точку \mathbf{R} , и углов ориентации ее максимума α_0 и φ_0 ; F_f – множитель, учитывающий сферическое и рефракционное ослабление волны, обусловленное лучевой расходимостью звукового пучка; F_e – множитель, учитывающий приземное ослабление звука при интерференции основной волны и отраженной от земли; α_Σ – суммарный коэффициент классического, молекулярного и турбулентного ослабления звука [14, 15].

Каждой j -й точке рассеяния с координатами \mathbf{R}_j , являющейся узлом численного интегрирования в (4), соответствует одна или более пар лучей, содержащих прямой и рассеянный лучи. Поэтому в расчетах в качестве переменных интегрирования в (4) были выбраны вертикальный α_1 и азимутальный φ_1 углы выхода прямого луча, а также вертикальный α_2 прихода рассеянного луча. В этом случае рефракционная задача сводилась к определению азимутального угла φ_2 и вертикальной координаты z_j точки \mathbf{R}_j при заданных α_1 , φ_1 и α_2 из системы уравнений

$$x_{1j} + x_{2j} = d, \quad y_{1j} + y_{2j} = 0, \quad (6)$$

где x_{1j} и y_{1j} – проекции прямого луча от источника до \mathbf{R}_j на оси X и Y , соответственно; x_{2j} и y_{2j} – то же самое для рассеянного луча от \mathbf{R}_j до точки приема, удаленной от источника на расстояние d вдоль оси X . Величины указанных проекций в зависимости от местоположения точки \mathbf{R}_j могли иметь как положительные, так и отрицательные значения и рассчитывались из уравнения звукового луча для стратифицированной движущейся среды [10].

Измеряемой величиной в эксперименте является звуковое давление. Поэтому в приведенных выше формулах необходимо исключить интенсивность I , учитывая соотношение [10]:

$$I = p^2 (1 + \mathbf{n} \mathbf{v}/c) U(2\rho c), \quad (7)$$

где p – звуковое давление, Па; $U = |\mathbf{cn} + \mathbf{v}|$ – групповая скорость звука; ρ – плотность воздуха. Пусть звуковое давление, создаваемое источником на расстоянии в 1 м от его апертуры, равно p_0 . Тогда в силу (7) $I_0 = p_0^2 g_1 / (2\rho_1 c_1)$, где $g_1 = [1 + v_1/c_1 \cos\alpha_1 \cos(\varphi_v - \varphi_1)] [c_1^2 + 2 v_1/c_1 \cos\alpha_1 \cos((\varphi_v - \varphi_1) + \varphi_1^2)]^{1/2}$.

Аналогично для интенсивности звука в точке приема, создаваемой при его рассеянии элементарным объемом dV , имеем $dL_r = d p_r^2 g_2 / (2\rho_2 c_2)$, где выражение для g_2 записывается идентично g_1 . В первом случае здесь подставляются значения параметров среды c , \mathbf{v} и ρ в начальной точке прямого луча, во втором – в конечной точке рассеянного луча. Учитывая последние два соотношения, из (4) получаем расчетную формулу

$$L_r = I_0 + 10 \cdot \lg \left\{ \frac{\rho_2 \cdot c_2}{\rho_1 \cdot c_1} \int_{\alpha_{1\min}}^{\alpha_{1\max}} \int_{\phi_{1\min}}^{\phi_{1\max}} \int_{\alpha_{2\min}}^{\alpha_{2\max}} \hat{F}(R_j) d\alpha_1 d\phi_1 d\alpha_2 \right\}, \quad (8)$$

где $\hat{F}(\mathbf{R}_j) \approx g_1(\alpha_1, \varphi_1) / [g_2(\alpha_2, \varphi_2) s_2(\mathbf{R}_j) \sin\xi_j] F(\alpha_1 - \alpha_0, \varphi_1 - \varphi_0) \times M[\tau_i/2 + \tau_{\min} - \tau(\mathbf{R}_j)] F_e(\mathbf{R}_j) \exp[-\alpha_\Sigma s(\mathbf{R}_j)]$.

Данная формула позволяет численно оценивать пиковое значение звукового давления. С этой целью в функции $M(\cdot)$ дополнительно учитывается время распространения звука τ_{\min} вдоль лучей с вертикальными углами выхода $\alpha_{1\min}$ и $\alpha_{2\min}$ при $\varphi_1 = 0$, для которых потери звуковой энергии минимальны. Здесь время $t = \tau_i/2 + \tau_{\min}$, отсчитываемое с начала излучения импульса длительности τ_i , соответствует моменту регистрации максимума амплитуды рассеянного сигнала. Описанная выше рефракционная задача относительно φ_2 и координат \mathbf{R}_j , решается в (8) для каждого сочетания значений α_1 , φ_1 и α_2 , используемого при численном интегрировании. Отдельной задачей, не рассмотренной здесь, является вычисление с учетом рефракции значений углов ξ и θ в точке \mathbf{R}_j при заданных α_1 , φ_1 , α_2 и профилях $T(z)$ и $\mathbf{v}(z)$. Методика численного ее решения из точных уравнений геометрической акустики изложена в [11]. Значения углов $\alpha_{1\min}$ и $\alpha_{2\min}$ задавались в (8) из условия касания прямого и рассеянного лучей поверхности Земли в случае $\varphi_1 = 0$; углов $\alpha_{1\max}$, $\phi_{1\min}$, и $\phi_{1\max}$ – с учетом диаграммы направленности F по уровню 0,1 от максимума; угла $\alpha_{2\min}$ – из условия $\theta < 90^\circ$ (в атмосфере интенсивность звука, рассеянного под углами $90 \leq \theta \leq 180^\circ$, значительно меньше, чем интенсивность звука, рассеянного в переднюю полусферу). Учет отраженных от Земли лучей с углами выхода $\alpha_1 < \alpha_{1\min}$ и $\alpha_2 < \alpha_{2\min}$ выполняется в (8) при вычислении множителя приземного ослабления $F_e(\mathbf{R}_j)$.

Программный комплекс «Прогноз». Приведенные выше алгоритмы были использованы при разработке программного комплекса «Прогноз», предназначенного для оперативной оценки звуковых давлений в слышимом диапазоне частот при удалении точки наблюдения от источника звука до 10 км.

В проблеме прогнозирования (оценивания) уровня звука исходными являются четыре группы входных параметров: метеорологические величины, характеристики подстилающей поверхности, звукового источника и трассы распространения. Из метеорологических величин рассматриваются скорость v и направление φ_v горизонтальной компоненты ветра, температура T и относительная влажность воздуха u , атмосферное давление p_a , структурные постоянные флуктуаций температуры C_T^2 и скорости ветра C_V^2 . Диагностика режима распространения звука базируется на анализе высотного распределения значения и знака градиента фазовой скорости звука.

Экспериментальные результаты. Программный комплекс прошел испытания в натуральных условиях. При проведении экспериментальных исследований использовалась акустическая излучающая система мощностью 1,8 кВт, включающая антенную решетку из 24 рупорных громкоговорителей и 6 усилителей мощности с единым микшерным пультом. Средний уровень излучаемого звука на расстоянии 1 м от апертуры составлял примерно 138–147 дБ в диапазоне частот от 315 Гц до 4 кГц. Вдоль двух приземных трасс распространения длиной до 6 км на различных расстояниях было организовано по три приемных пункта сбора данных о звуковом давлении, измеряемом операторами с помощью шумомеров через октавные фильтры.

Акустический сигнал излучался сериями из 20 импульсов длительностью около 0,5 с с интервалами между ними в 2 с. Такая серия повторялась для каждой частоты от 315 Гц до 4 кГц через терцию. На этом заканчивался один цикл измерений длительностью около 25 мин. Всего было прове-

дено 33 цикла измерений, соответствующих случаю волноводного распространения звука, и 19 циклов измерений, соответствующих случаю попадания операторов в зону акустической тени. В каждом из них были определены средние по 20 измерениям значения звукового давления $L_r(f)$ на всех контролируемых частотах f и при различных удалениях операторов d , а также их дисперсии и доверительные интервалы (с доверительной вероятностью, равной 0,95). Ошибка прогноза $S(f)$ на частоте f оценивалась как разность между вычисленным и измеренным значениями $L_r(f)$.

Результаты сравнения показали, что в целом частотные зависимости вычисленного и измеренного звукового давления в этом диапазоне частот достаточно хорошо согласуются.

В экспериментах было выявлено, что основным источником ошибок прогноза является неточное задание метеорологической информации. При этом ошибки задания данной информации можно разбить на три группы. Во-первых, существует методическая ошибка, связанная с использованием предположения о горизонтальной однородности метеорологических полей в атмосфере. Данная ошибка может быть устранена только путем существенного усложнения используемых алгоритмов. Последнее приведет к недопустимому увеличению времени, необходимого для осуществления оперативного прогноза. Кроме того, ее устранение подразумевает наличие мощной измерительной сети, способной осуществить контроль метеорологических параметров вдоль всей трассы распространения звука. Во-вторых, метеорологические данные со станции радиозондирования, включавшие помимо приземных значений метеопараметров также и вертикальные профили температуры и скорости ветра, и использованные при обработке экспериментальных результатов, поступали через относительно большой дискрет по времени, равный 2 ч. Время сбора информации об уровнях звуковых давлений в измерительных точках по одному циклу измерений, указанное выше, также превышало величину, обычно принимаемую за интервал стационарности метеорологических полей. Поэтому при нестабильной метеорологической обстановке, когда средние профили метеорологических параметров сильно меняются во времени, качество прогноза в проведенных экспериментах должно ухудшаться. Наконец, всегда существуют приборные ошибки самих измерительных средств.

При проведении данных экспериментов в основном преобладали стабильные метеорологические условия. Обычно наблюдался ветер с малой дисперсией его направления, примерно равный по абсолютной величине 5–7 м/с на высоте 2 м, и отрицательный градиент температуры порядка 8–10 град/км.

Итоговые результаты экспериментальной оценки качества прогноза уровня звука по частотному диапазону 315–2000 Гц для различных дальностей и режимов распространения приведены в таблице.

Здесь, \bar{S} – средняя ошибка прогноза по всем циклам; P_i – вероятность попадания прогнозируемого давления в доверительный интервал; P_6 – вероятность ошибки прогноза, не превышающей 6 дБ. Учитывая трудности контроля изменчивых метеорологических условий, средние ошибки прогноза в 2–3 дБ являются хорошим результатом, подтверждающим качественную работу программно-алгоритмического комплекса.

Заключение. Приведено описание алгоритмов для вычисления уровня звука при приземном распространении в атмосфере и реализованных в программный комплекс «Прогноз». Проведена оценка прогнозирования уровня звукового давления от удаленного источника. Хорошая точность предсказания уровня звукового давления была подтверждена в натурных испытаниях. Возможна широкая область применения описанного программного комплекса или всей системы оперативного прогноза. Это оперативное оценивание уровня звука в любом удаленном пункте, исследование шумового загрязнения атмосферы проектируемым образцом техники, расчет санитарных зон промышленных объектов по создаваемому шуму в атмосфере, построение карт распределения шума в населенных пунктах при ограниченном количестве его источников, оценивание слышимости звуковещательных установок и т.д.

Литература

1. Advances in atmospheric acoustics / E.H. Brown, F.F. Hall // Rev. Geophys. and Space Phys. – 1978. – Vol. 16, № 1, February. – P. 47–110.

Экспериментальная оценка качества прогноза уровня звукового давления

Волноводный режим, 33 цикла × 20 импульсов				Антиволноводный режим, 19 циклов × 20 импульсов			
d , м	\bar{S} , дБ	P_6	P_i	d , м	\bar{S} , дБ	P_6	P_i
3000	+3,2	0,67	0,67	3575	-2,3	0,83	0,78
4500	+2,3	0,67	0,68	4135	-2,3	0,82	0,75
6000	+1,5	0,80	0,74	4800	-1,5	0,82	0,82

2. Красненко Н.П. Приземное распространение звуковых волн в атмосфере // Сб. трудов XV сессии Российского акустического общества «Акустические измерения. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана». – М.: ГЕОС, 2004. – Т. 2. – С. 97–102.
3. Krasnenko N.P. Sound propagation in the atmosphere above the ground surface at long distances // Proc. SPIE. – 2005. – Vol. 6160, part 2. – P. 1–12.
4. Красненко Н.П. Дальнее звуковое вещание: проблемы, итоги, возможности // Сверхширокополосные сигналы в радиолокационных и акустических системах: конспекты лекций / Науч. совет по распространению радиоволн; Муром. ин-т Влад. гос. ун-та. – Муром: Изд.-полиграф. центр МИ ВлГУ, 2006. – С. 96–115.
5. Красненко Н.П. Дальнее звуковое вещание в атмосфере: проблемы, возможности, результаты // Сб. трудов XX сессии Российского акустического общества «Акустические измерения и стандартизация. Электроакустика. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана». – М.: ГЕОС, 2008. – Т. 2. – С. 137–143.
6. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
7. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику / С.М. Рытов, Ю.А. Кравцов, В.И. Татарский. – М.: Наука, 1978. – Т. 2. – 469 с.
8. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
9. Осташев В.Е. Геометрическая акустика движущейся среды: обзор // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1989. – Т. 25, № 9. – С. 899–916.
10. Осташев В.Е. Распространение звука в движущейся среде. – М.: Наука, 1992. – 206 с.
11. Влияние рефракции на параметры геометрии акустического зондирования / А.Я. Богушевич, Н.П. Красненко // Оптика атмосферы и океана. – 1994. – Т. 7, № 9. – С. 1258–1274.
12. Salomons E.M. Computational atmospheric acoustics. – Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishers, 2001. – 335 p.
13. Attenborough K. Predicting outdoor sound / K. Attenborough, K.M. Li and K. Horoshenkov. – London; New York: Taylor & Francis, 2007. – 441 p.
14. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. – Новосибирск: Наука, 1986. – 167 с.
15. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. – Томск, 2001. – 278 с.
16. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 342 с.
17. Возможности оперативного прогноза приземного распространения акустических шумов в атмосфере с учетом метеорологических условий / Н.Г. Абрамов, А.Я. Богушевич, В.И. Карпов и др. // Оптика атмосферы и океана. – 1994. – Т. 7, № 3. – С. 403–413.
18. Delany M.E., Bazley E.N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials // Appl. Acoust. – 1970. – № 3. – P. 105–116.
19. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука. – 1978. – 512 с.
20. Бреховских Л.М. Теоретические основы акустики океана / Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 264 с.
21. Определение структурной постоянной акустического показателя преломления в пограничном слое атмосферы по измерениям звукового давления в зоне тени / А.Я. Богушевич, Н.П. Красненко // Акустический журнал. – 1996. – Т. 42, № 3. – С. 339–346.

Красненко Николай Петрович

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. радиотехнических систем ТУСУРа, в.н.с. ИМКЭС СО РАН

Тел.: 8 (382-2) 49-24-18

Эл. почта: krasnenko@imces.ru

Krasnenko N.P.

Sound propagation in the atmosphere above the ground surface

In this paper we present the results of investigations on the influence of the atmospheric channel on the sound propagation above the ground surface. We describe the algorithms for calculating the sound pressure level and the software package «Prognoz», which is intended for real-time estimation of the mean field of the sound pressure level from a remote sound source in the ground atmospheric layer. The software package considers the characteristics of the sound source, vertical profiles of the main meteorological parameters, the characteristics of the underlying surface, and the parameters of the atmospheric turbulence. The results of numerical estimation and field tests of this software package for distances from an acoustic source up to 6 km are also given in the paper.

Keywords: atmosphere, sound, propagation, forecast of the sound pressure level.